

Problematyka oddziaływania osuwisk na obiekty drogowe

MACIEJ CZUB 

Instytut Mechaniki Górotworu PAN, ul. Reymonta 27; 30-059 Kraków

Streszczenie

Artykuł analizuje wieloaspektowe zagadnienia związane z wpływem osuwisk na infrastrukturę drogową. Główne tematy poruszane w pracy obejmują klasyfikację osuwisk, metody stabilizacji, przykłady osuwisk w Polsce, rozpoznanie terenu osuwiskowego oraz technologie wzmocnień podłoża. W części dotyczącej klasyfikacji osuwisk przedstawiono różne typy osuwisk w zależności od mechanizmu ich powstawania, materiału i prędkości ruchu. Omówiono również metody stabilizacji osuwisk, takie jak drenaż, wzmocnienia cementacyjne, gwoździowanie gruntów oraz stosowanie geosyntetyków. W artykule zamieszczono przykłady znaczących osuwisk w Polsce, które miały istotny wpływ na infrastrukturę drogową.

Ponieważ rozpoznanie terenu, to kluczowy element prewencji i zarządzania ryzykiem związanym z osuwiskami w artykule opisano również techniki geologiczne i geofizyczne, które pozwalają na ocenę ryzyka wystąpienia osuwisk. Dodatkowo, omówiono nowoczesne technologie wzmocnień podłoża, w tym stosowanie iniekcji cementowych, mikropali oraz technologii wspomagających monitorowanie stabilności gruntów. Celem artykułu jest przedstawienie skutecznych metod rozpoznawania i stabilizacji osuwisk w kontekście bezpieczeństwa i trwałości infrastruktury drogowej.

Słowa kluczowe: osuwiska, wzmocnienia podłoża, infrastruktura drogową, nasypy drogowe

1. Wprowadzenie

Osuwiska to procesy geomorfologiczne, polegające na nagłym, masowym przemieszczaniu się masy gruntu pod wpływem siły grawitacji, wzdłuż powierzchni poślizgu, na której nastąpiło ścięcie. Osuwiska szczególnie często występują w rejonach o sprzyjającej im budowie geologicznej, gdzie warstwy gruntów przepuszczalnych i nieprzepuszczalnych występują naprzemiennie [1,2].

Klasyfikacja osuwisk:

Procesy geodynamiczne klasyfikowane na podstawie kilku kryteriów, którymi są:

- rodzaj materiału: skalne, gruntowe, mieszane;
- prędkość: od bardzo powolnych przemieszczeń do gwałtownych zjazdów;
- mechanizm powstawania: osuwanie się, spływanie, przesuwanie, obrywanie się.

Przyczyny powstawania osuwisk:

- a) naturalne:
 - warunki wodne: nasiąknięcie gruntu, podmywanie przez wodę, zmiany poziomu wód gruntowych.
 - erozja: działanie wód powierzchniowych, wiatru;
 - aktywność sejsmiczna: trzęsienia ziemi mogące wywołać destabilizację zbocza;
 - zmiany w obciążeniu gruntu: np. przez topnienie śniegu.
- b) antropogeniczne:
 - ingerencje w teren: wycinanie drzew, niekontrolowane wydobywanie surowców, nieprawidłowe składowanie materiałów;
 - budownictwo: niewłaściwe projektowanie i realizacja robót ziemnych, budowa dróg w strefach osuwiskowych [3];
 - zanieczyszczenia: mogące wpływać na zmiany właściwości fizykochemicznych gruntów.

Skutki osuwisk:

- a) bezpośrednie:
 - zniszczenie infrastruktury: budynki, drogi, mosty oraz infrastruktura obejmująca sieci uzbrojenia podziemnego terenu,
 - zagrożenie dla życia i zdrowia,
 - zniszczenie terenu rolnego i zasobów naturalnych;
- b) pośrednie:
 - problemy z dostępem do dotkniętych obszarów, problemy z infrastrukturą komunikacyjną, oraz dostawami,
 - ekologiczne: zmiany w ekosystemie, zanieczyszczenie wód, erozja.

2. Przykłady osuwisk na drogach w Polsce

Osuwiska w polskich Karpatach, takich jednostkach, jak Tatry, Beskidy i Sudety, stanowią obszary podatne na występowanie zarówno skalnych, jak i gruntowych procesów geodynamicznych. W przeszłości miały miejsce różne incydenty związane z osuwiskami, które wpłynęły na normalny ruch drogowy. Na przykład, w 2009 roku doszło do osunięcia się skał na drodze krajowej nr 47 w okolicach Żywca, co spowodowało znaczne utrudnienia w ruchu [15].

Na terenie polskich Karpat fliszowych odnotowano ponad 8500 przypadków osunięć ziemi, w tym 2970, które stanowią realne zagrożenie dla struktur budowlanych. Spośród tych przypadków, 1670 osunięć zagrażało budynkom mieszkalnym, 49 liniom kolejowym, a 1072 drogom kołowym. W Polsce, aż 95% wszystkich zarejestrowanych osunięć ziemi występuje na obszarze Karpat, pomimo że zajmują one tylko 6% powierzchni kraju. Obecnie liczba tych przypadków sięga 23 000, co oznacza, że przeciętnie przypada ponad jedno osuwisko na każdy kilometr kwadratowy powierzchni. Gdy analizujemy mniejsze części Karpat, poszczególne grupy górskie lub zlewnie potoków, zauważamy, że w niektórych przypadkach 30% lub nawet 70% stoków jest dotkniętych osuwiskami. To wyraźnie wskazuje na wysokie ryzyko występowania osunięć ziemi na tych obszarach [15,4].

Osuwiska stanowią również problem na trasach wojewódzkich w Polsce. Przykładem jest sytuacja z 2020 roku, kiedy to doszło do osunięcia ziemi na trasie wojewódzkiej nr 968 w okolicach miejscowości Łapanów województwa małopolskiego. Skutkowało to zamknięciem tej drogi na określony okres czasu.

Chociaż osuwiska są bardziej typowe dla obszarów górskich, to niektóre trasy ekspresowe i autostrady w Polsce również mogą być narażone na to ryzyko. Na przykład osunięcia ziemi mogą wystąpić na trasie A4 w rejonie Mysłowic.

Osuwiska błotne stanowią kolejny rodzaj tego typu ryzyka i mogą mieć miejsce na obszarach, gdzie ziemia jest nasycona wodą. W 2017 roku doszło do poważnego osunięcia błotnego w okolicach Koszalina, co wpłynęło na utrudnienia ruchu na autostradzie A6.

3. Rozpoznanie terenu osuwiskowego

3.1. Metody rozpoznawcze terenu

W rozpoznaniu terenu osuwiskowego ważną kwestią jest szczegółowe poznanie topografii, właściwości gruntów, struktury geologicznej i innych parametrów terenowych. Badania rozpoznawcze terenu są niezbędne do zebrania danych, które umożliwiają rozpoznanie obszaru pod względem potencjalnego ryzyka wystąpienia osunięć.

Do rozpoznania oraz monitorowania osuwisk wykorzystuje się: technologie satelitarne, które monitorują przemieszczanie się terenu za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR), georadary do rozpoznania budowy zbocza, inklinometry do pomiaru przemieszczeń horyzontalnych w otworach oraz pomiary hydrologiczne do monitorowania poziomu wód gruntowych [5-7].

3.1.1. Fotogrametria

Fotogrametria to technologia, która wykorzystuje zdjęcia lotnicze lub satelitarne do uzyskania trójwymiarowego modelu terenu. Proces ten obejmuje analizę paralaksy między różnymi perspektywami zdjęć,

co pozwala na określenie wysokości i nachyleń terenu. Fotogrametria jest szczególnie użyteczna w obszarach, gdzie dostępność terenowa jest ograniczona [7].

3.1.2. Teledetekcja

Teledetekcja polega na zbieraniu danych zdalnie pozyskiwanych, takich jak obrazy satelitarne, skany laserowe (LiDAR) czy zdjęcia wykonywane z wykorzystaniem dronów. Te technologie pozwalają na monitorowanie i analizę terenu w różnych skalach. Teledetekcja może wykrywać niewielkie zmiany topograficzne, co jest niezwykle przydatne w identyfikacji obszarów gdzie mogą wystąpić osunięcia [5].

3.1.3. Badania geofizyczne

Badania geofizyczne polegają na wykorzystaniu różnych zjawisk, takich jak sejsmiczność, elektromagnetyzm czy radar, do analizy budowy podłoża geologicznego. Dzięki nim można rozróżnić warstwy gruntów o różnych właściwościach mechanicznych, co pozwala identyfikować obszary osuwiskowe. Badania te pomagają również w określeniu głębokości i charakterystyki warstw skalnych.

3.1.4. Analiza geologiczna i geotechniczna

Analiza geologiczna skupia się na badaniach rodzaju gruntów, w tym również skał, ich składu mineralnego i struktury geologicznej obszaru. To kluczowe informacje, które pomagają zrozumieć, czy w danym regionie istnieją potencjalne warunki do powstawania osuwisk. Analiza geotechniczna natomiast koncentruje się na badaniu właściwości mechanicznych gruntów, ich nośności, spójności i innych parametrów, które wpływają na stabilność terenu [8].

3.1.5. Terenowe obserwacje i pomiary

Terenowe obserwacje to praca w terenie, która obejmuje zarówno analizę wizualną, jak i pomiary przy użyciu różnych instrumentów geodezyjnych. Wykorzystywane są między innymi takie instrumenty jak niwelatory i systemy GPS, aby zbierać dane dotyczące ukształtowania terenu.

3.2. Ocena stanu geotechnicznego gruntów

Ocena stanu geotechnicznego gruntów to ważny element rozpoznania terenów osuwiskowych. Jej celem jest rozpoznanie właściwości mechanicznych gruntu, co pozwala na określenie stabilności terenu oraz ryzyka wystąpienia osunięć. Prawidłowo przeprowadzona ocena stanu geotechnicznego dostarcza istotnych informacji, które są niezbędne do planowania i zarządzania obszarami, na których mogą wystąpić osuwiska, a finalnie do oceny konieczności zastosowania wzmocnień skarp i podłoża gruntowego oraz wyboru odpowiedniej technologii wzmocnienia [2].

3.2.1. Badania geotechniczne

Badania geotechniczne stanowią podstawę dla określenia układu warstw, oraz oceny stanu gruntów na terenach osuwiskowych. W tym celu przeprowadza się:

- **Badania próbek gruntów:** Pobieranie próbek gruntów z różnych punktów obszaru osuwiskowego i poddawanie ich analizom laboratoryjnym. Te analizy pozwalają określić skład mineralny, granulometrię, nośność, plastyczność i inne istotne parametry gruntu.
- **Badania zagęszczenia gruntów:** Osunięcia gruntów często występują w luźnych lub niezagęszczonych warstwach. Badania zagęszczenia pozwalają ocenić gęstość gruntów i ewentualną potrzebę zagęszczenia.
- **Badania parametrów poślizgu gruntów:** Wartość kąta wewnętrznego tarcia między cząstkami gruntu pozwala ocenić stabilność gruntu. Niska wartość tego kąta może wskazywać na podatność na osunięcia.
- **Określenie przekrojów geotechnicznych:** na podstawie wykonanych profili otworów geotechnicznych sporządza się przekroje geotechniczne, które pokazują układ warstw gruntowych i potencjalne strefy poślizgu [8].

3.2.2. Analiza parametrów geotechnicznych

Na podstawie wyników badań można określić istotne parametry geotechniczne, takie jak:

- Spójność: Parametr ten mierzy siłę wiązania między cząstkami gruntu. Wysoka spójność oznacza większą stabilność gruntu.
- Kąt tarcia wewnętrznego: To miara oporu gruntu na ścinanie. Niski kąt tarcia wewnętrznego może zwiększać ryzyko osunięć.
- Nośność gruntów: Określa, ile obciążenia grunt jest w stanie unieść, zanim dojdzie do deformacji lub osunięcia.
- Plastyczność: Mierzy zdolność gruntu do odkształcania się pod wpływem obciążenia. Grunty o dużej plastyczności mogą być bardziej podatne na osunięcia.

3.2.3. Modelowanie numeryczne

Modelowanie numeryczne to narzędzie pozwalające na symulację i analizę zachowania gruntów w różnych warunkach. Dzięki temu można przewidzieć, jakie będą skutki zmian w obciążeniach, wilgotności czy temperaturze na stabilność terenu. Modele numeryczne umożliwiają również testowanie różnych scenariuszy rozkładu obciążenia oraz analizę celowości zastosowanego wzmocnienia podłoża gruntowego.

3.2.4. Interpretacja wyników

Ostateczna ocena stanu geotechnicznego gruntów polega na interpretacji wyników badań i analizy parametrów geotechnicznych. Na podstawie tych danych można określić, czy grunt jest stabilny, oraz czy istnieje ryzyko osunięć co pozwala dobrać odpowiednie środki zaradcze [9].

4. Technologie wzmocnienia podłoża

4.1. Geosyntetyki i ich zastosowanie

Geosyntetyki są to produkty wytwarzane z materiałów polimerowych, które używa się w połączeniu z gruntem lub innym materiałem, aby poprawić jego właściwości. Wytwarzane są one z różnych polimerów, takich jak: polipropylen, poliester czy polietylen. Klasyfikuje się je w zależności od ich funkcji, struktury i procesu produkcyjnego. Do głównych kategorii geosyntetyków należą: geotkaniny, geogridy, geomembrany, georurki, geosiatki i geokompozyty [10,12].

Zastosowanie materiałów podobnych do geosyntetyków było już wykorzystywane w czasach starożytnych, jak na przykład wykorzystywanie traw i roślin do stabilizacji nasypów. Nowoczesne geosyntetyki zaczęto stosować w latach 60. XX wieku, a w dzisiejszych czasach są one powszechnie stosowane i rozwijane na całym świecie.

4.1.1. Zalety i wady stosowania geosyntetyków

Zalety:

- zwiększenie wytrzymałości i stabilności konstrukcji,
- oszczędność materiałów i kosztów,
- zmniejszenie potrzeby eksploatacji surowców naturalnych,
- łatwość i szybkość instalacji.

Wady:

- ograniczona odporność na promieniowanie UV i czynniki chemiczne (choć nowoczesne geosyntetyki są coraz bardziej odporne na te czynniki),
- potrzeba dokładnej instalacji, aby uniknąć uszkodzeń,
- trudność w recyklingu niektórych rodzajów geosyntetyków.

4.1.2. Rodzaje geosyntetyków stosowanych w wzmocnieniu nasypów drogowych

a) Geotkaniny:

Są to materiały przypominające tkaniny, produkowane przez tkanie, dzianie lub spinanie włókien polimerowych. Geotkaniny są stosowane jako filtry, separatory lub jako wzmocnienie. Dzięki specyficznej strukturze, pozwalają na przepływ wody, jednocześnie zapobiegając mieszanii się różnych warstw materiału gruntowego.

b) Geosiatki:

To materiały o strukturze siatkowej, często wykonane z polipropylenu czy polietylenu. Ich główną funkcją jest wzmocnienie, a ich struktura pozwala na zakotwiczenie cząstek gleby lub kruszywa, zapewniając lepszą stabilność konstrukcji. Są szczególnie efektywne w wzmocnieniu nasypów na podłożach o niskiej nośności.

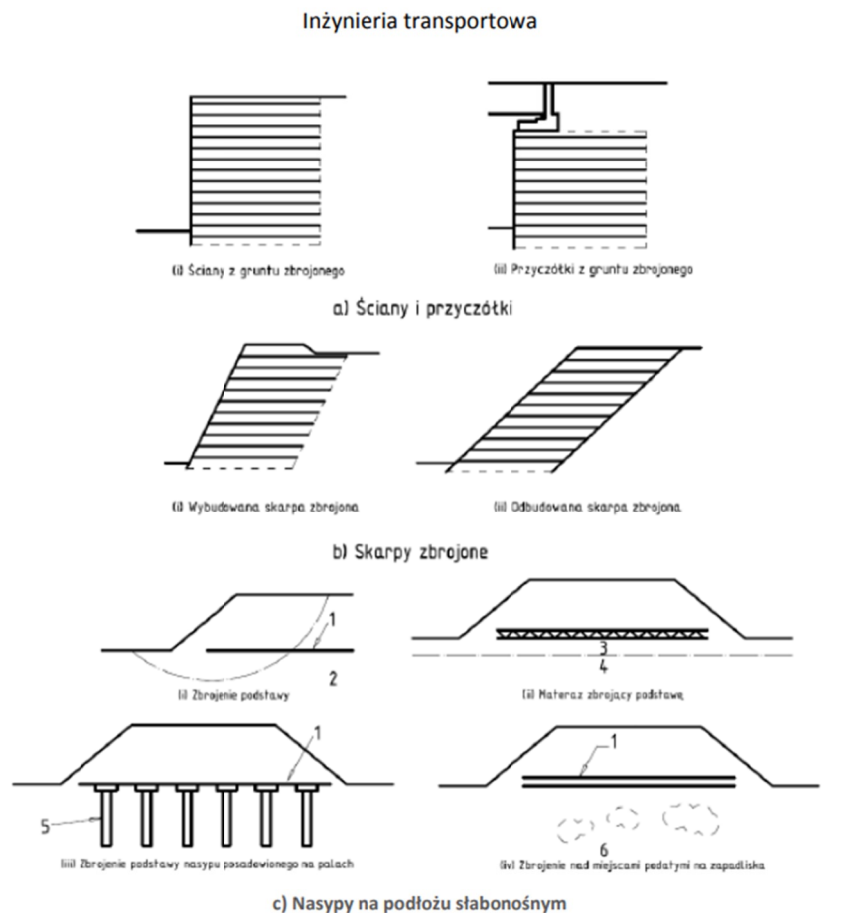
c) Geokompozyty:

Jak sama nazwa wskazuje, geokompozyty jest to kombinacja dwóch lub więcej geosyntetyków, takich jak np. geotkanina z geosiatką. Przy takim połączeniu można wykorzystać korzyści obu z materiałów, łącząc jednocześnie funkcje filtracji i wzmocnienia. Przykładem mogą być produkty stosowane do drenażu, gdzie geosiatka zapewnia kanały do odprowadzania wody, a geotkanina działa jako filtr [13].

4.1.3. Mechanizmy wzmocnienia geosyntetykami:

a) Rozdział sił nacisku (rozproszenie obciążenia):

Poprzez zastosowanie geosyntetyków, siły nacisku mogą być rozprowadzane na większej powierzchni, redukując w ten sposób skoncentrowane naprężenia w określonych punktach, przez co podłoże jest mniej narażone na nadmierne odkształcenia i osiadania. Geotkaniny i geosiatki są często stosowane w tym celu, działając jako rozpraszacze obciążenia.



1 - element zbrojący, 2 - słabe podłoże gruntowe, 3 - warstwa słaba o małej miąższości, 4 - warstwa nośna, 5 - pale/kolumny, 6 - podłoże ze słabymi strefami

Rys. 1. Zastosowanie zbrojenia geosyntetycznego wg BS 8006:2010 [16]

b) Wzmacnianie przez więzy:

Geosiatki, ze względu na swoją strukturę siatkową, mogą tworzyć więzy z cząstkami gruntu, kruszyw czy innymi materiałami. Więzy te pomagają w zwiększeniu spójności mas materiału, tworząc bardziej stabilną strukturę. Ma to swoje znaczenie praktyczne, ponieważ dzięki unikatowej strukturze, geosiatki stosowane np. w nasypach czy na zboczach pozwalają na utrzymanie ich stabilności, pomimo oddziaływania na dużych obciążeniach.

c) Wzmacnianie przez tarcie i zakotwienie:

Niektóre geosyntetyki, zwłaszcza geotkaniny, mogą być zakotwiczone w gruncie lub innym materiale dzięki ich powierzchniowej teksturze. Interakcja tarcia pomiędzy geosyntetykiem a gruntem pozwala na przekazanie obciążeń, zapewniając dodatkowe wzmocnienie. Oprócz tego zakotwienie geosyntetyku w podłożu gruntowym zwiększa jego zdolność do oporu przed przemieszczeniami [11].

4.1.4. Metody projektowania wzmocnień geosyntetycznych:

Aby osiągnąć zamierzone wyniki jak i trwałość konstrukcji niezbędne jest prawidłowe zaprojektowanie wzmocnień geosyntetycznych. Głównymi aspektami i metodami w projektowaniu są:

a) Kryteria projektowania:

- Bezpieczeństwo: W pierwszej kolejności konieczne jest zapewnienie bezpiecznego rozwiązania, które będzie w stanie wytrzymać obciążenia oraz inne potencjalne zagrożenia, takie jak erozja czy osuwiska.
- Funkcjonalność: Geosyntetyk musi spełniać swoją główną funkcję, czy to wzmocnienie, filtracja, drenaż, czy separacja.
- Trwałość: Materiał powinien być wybrany z uwzględnieniem długości życia projektowanej konstrukcji oraz warunków środowiskowych.

b) Modele obliczeniowe:

- Modele oparte na teorii granic: Są to modele, które opierają się na koncepcji równowagi granicznej, takiej jak metoda Wedge lub metoda Log Spiral.
- Modele oparte na mechanicznej odpowiedzi materiału: Te modele analizują zachowanie geosyntetyków i gleby w odpowiedzi na obciążenia, uwzględniając takie czynniki jak deformacje i naprężenia.

c) Wyznaczenie właściwości mechanicznych geosyntetyków:

- Testy naciągania: Pozwalają określić wytrzymałość na rozciąganie materiału i jego moduł sprężystości.
- Testy ścinania: Wykorzystywane do określenia właściwości tarcia pomiędzy geosyntetykiem a gruntem lub kruszywem.
- Testy trwałości: Takie jak testy odporności na promieniowanie UV, działanie wody czy czynników chemicznych, które pomagają określić, jak długo geosyntetyk zachowa swoje właściwości w danym środowisku.

d) Interakcja z gruntem:

Aby prawidłowo zaprojektować wzmocnienie z wykorzystaniem geosyntetyków niezbędne jest przyjęcie odpowiednich parametrów gruntów z którymi zastosowany materiał ma współpracować. Aby je uzyskać należy przeprowadzić odpowiednie badania granulometrii, gęstości, wilgotności oraz właściwości mechanicznych gruntu.

4.1.5. Praktyczne aspekty zastosowania geosyntetyków w wzmocnieniu nasypów drogowych:

W rzeczywistości to jak skuteczne będą zastosowane geosyntetyki nie zależy jedynie od ich właściwości materiałowych. Ważne są również metody i technologia ich wbudowania, a także sposób integracji z pozostałymi elementami budowlanymi. Aby to uzyskać trzeba zwrócić uwagę na kilka aspektów takich jak:

a) Wyznaczenie właściwości mechanicznych geosyntetyków:

- Ocena podłoża: Przed instalacją geosyntetyków niezbędne jest szczegółowe zbadanie i ocena podłoża, aby dostosować odpowiedni rodzaj i klasę wytrzymałości geosyntetyku.
- Wyrównanie i zagęszczenie: Powierzchnia, na której ma być zainstalowany geosyntetyk, powinna być w miarę możliwości gładka i dobrze zagęszczona, aby zapewnić równomierny rozkład obciążeń.

- b) Wbudowanie geosyntetyków:
- Orientacja i naprężenie: Geosyntetyki powinny być układane w taki sposób, aby ich główne kierunki wytrzymałości były zgodne z kierunkami głównych obciążeń.
 - Złączenia: Pojedyncze arkusze lub pasy geosyntetyków muszą być prawidłowo łączone, najczęściej poprzez zgrzewanie lub zszywanie, zapewniając ciągłość funkcji wzmocnienia.
- c) Ochrona geosyntetyków:
- Ochrona przed uszkodzeniami mechanicznymi: Podczas wbudowania ważne jest zachowanie odpowiedniej ostrożności, by nie doszło do uszkodzenia geosyntetyków poprzez ostre krawędzie kruszywa, lub pracę ciężkiego sprzętu budowlanego.
 - Ochrona przed warunkami atmosferycznymi: Należy unikać długotrwałego narażenia geosyntetyków na promieniowanie UV, które może osłabiać niektóre polimery.
- d) Monitorowanie i kontrola jakości:
- Testy naciągania: Pozwalają określić wytrzymałość na rozciąganie materiału i jego moduł sprężystości.
 - Inspekcje w trakcie budowy: Regularne kontrole podczas etapów budowy mogą pomóc wykryć i skorygować ewentualne błędy, zanim staną się one problemem.
 - Badania nośności podłoża po wykonaniu wzmocnienia np.: płyta VSS.

4.1.6. Przykłady zastosowania geosyntetyków w praktyce

W wielu projektach wzmocnień można spotkać się z zastosowaniem geosyntetyków jako wybranej technologii do wzmocnienia nasypów drogowych, poniżej przedstawiono kilka przykładów ich zastosowania, które pokazują jak bogate jest ich zastosowanie i jak bardzo są skuteczne.

- a) Autostrada na obszarach o słabym podłożu:
Na terenach, gdzie podłoże jest słabe lub mało stabilne, tradycyjne metody budowy drogi mogą okazać się niewystarczające. Geosyntetyki, takie jak geotkaniny lub geosiatki, mogą być stosowane do wzmocnienia podłoża, dystrybucji obciążeń i zapobiegania osiadań nierównomiernych.
- b) Nasypy na terenach podmokłych:
Na terenach o wysokim poziomie wód gruntowych lub na obszarach bagiennych, geosyntetyki mogą zapewnić stabilność nasypu drogowego, zapobiegając jednocześnie przenikaniu wody i erozji. Geokompozyty drenażowe mogą znaleźć również swoje zastosowanie w odprowadzaniu wody z konstrukcji.
- c) Rozwiązania dla obszarów górskich:
W obszarach górskich, gdzie występuje ryzyko osunięć ziemi, geosyntetyki mogą być stosowane do wzmocnienia zboczy i zapewnienia ich stabilności. Ponadto, geosiatki i geoceli używane są do stabilizacji stoków, redukując erozję jednocześnie nie ingerując w naturalny krajobraz.
- c) Rekonstrukcja i naprawa dróg:
W przypadku gdy drogi uległy uszkodzeniu lub wymagana jest ich modernizacja, zamiast usuwania starej nawierzchni i zastąpieniu ją nową, co jest kosztowne i czasochłonne, można zastosować geosyntetyki, by wzmocnić istniejącą konstrukcję drogi.

4.1.7. Ekologiczne i ekonomiczne aspekty stosowania geosyntetyków

Stosowanie geosyntetyków jako wzmocnienia podłoża gruntowego przynosi wiele korzyści zarówno w aspekcie ekologii jak i ekonomii.

- a) Ekologiczne korzyści:
- Zmniejszenie zużycia zasobów naturalnych: Dzięki zastosowaniu geosyntetyków można ograniczyć potrzebę wykorzystania tradycyjnych materiałów, takich jak kamień czy piasek, co prowadzi do ochrony zasobów naturalnych.
 - Ochrona gleby i zapobieganie erozji: Geosyntetyki, takie jak geotkaniny czy geosiatki, pomagają stabilizować grunty, co przeciwdziała erozji i chroni środowisko.
 - Poprawa jakości wody: Geosyntetyki mogą służyć jako bariery dla zanieczyszczeń, redukując migrację szkodliwych substancji do wód gruntowych.
 - Zmniejszenie śladu węglowego: Budowa z użyciem geosyntetyków może wymagać mniej ciężkiego sprzętu i materiałów, co może prowadzić do redukcji emisji CO₂.

b) Ekonomiczne korzyści:

- Oszczędność kosztów: Używanie geosyntetyków może znacząco obniżyć koszty materiałów, transportu i robocizny w porównaniu z tradycyjnymi metodami budowy.
- Przedłużenie żywotności konstrukcji: Wzmocnienie i ochrona konstrukcji dzięki geosyntetykom może prowadzić do dłuższej trwałości i mniejszej potrzeby częstych napraw.
- Szybsza realizacja projektów: Zastosowanie geosyntetyków może przyspieszyć proces budowy poprzez eliminację niektórych etapów prac, takich jak kompaktowanie gruntu.
- Zmniejszenie kosztów utrzymania: Stabilność i długi okres użytkowalności konstrukcji wzmocnionych geosyntetykami mogą doprowadzić do zmniejszenia kosztów związanych z konserwacją wybudowanych budowli.

4.1.8. Potencjalne wyzwania i ograniczenia zastosowania geosyntetyków

Geosyntetyki oprócz wielorakich korzyści wynikających z ich zastosowania mają jednak wady i ograniczenia.

a) Długoterminowa trwałość materiału:

- Degradacja chemiczna: W pewnych warunkach, takich jak wysoka kwasowość gleby, geosyntetyki mogą ulec degradacji, co osłabia ich właściwości mechaniczne.
- Utrata właściwości pod wpływem promieniowania UV: Jeśli geosyntetyki są narażone na działanie słońca przez dłuższy czas, mogą ulec degradacji.

b) Uszkodzenia mechaniczne:

Geosyntetyki mogą być uszkodzone podczas instalacji przez ciężki sprzęt, kamienie lub inne ostre przedmioty.

c) Nieodpowiednie złączenie lub nakładanie materiałów:

Jeżeli arkusze geosyntetyków nie są prawidłowo połączone, cała struktura może stać się mniej efektywna lub nieskuteczna.

d) Interakcja z lokalnymi materiałami:

Lokalne kruszywa lub gleby mogą nie być zgodne z wybranym geosyntetykiem, co może prowadzić do problemów, takich jak zatykanie porów geotkanin.

e) Koszty:

W niektórych przypadkach początkowe koszty zakupu i instalacji geosyntetyków mogą być wyższe w porównaniu z tradycyjnymi metodami.

f) Wiedza i doświadczenie:

Aby odpowiednio zaprojektować wzmocnienie za pomocą geosyntetyków potrzebna jest wiedza w wielu aspektach, co przekłada się na to, że inżynierowie bez odpowiedniego doświadczenia zwykle popełniają błędy w projektowaniu tego typu wzmocnienia.

g) Trudności w usuwaniu lub recyklingu:

Po zakończeniu żywotności konstrukcji, usunięcie lub recykling geosyntetyków może być trudny lub kosztowny.

4.2. Technologie palowe

Już od czasów starożytnych ludzie stosowali technologie palową w bardzo prostych jej formach. Najprostsze formy technologii palowych były już znane przez starożytnych Egipcjan czy Rzymian. Przykładowo Rzymianie stosowali pnie drzew, które wbijali w grunt w celu zapewnienia stabilności konstrukcjom np. budynkom lub mostom. Z czasem nastąpiła ewolucja tego typu technologii, zaczęto stosować różnego typu materiały, jak i sposoby wbijania pali. Moment przełomowy w tej technologii nastąpił na przełomie XIX i XX wieku, gdy wynaleziono maszyny do wbijania pali co zwiększyło efektywność oraz możliwości zastosowania technologii palowej. Obecnie technologia palowa jest jedną z najważniejszych metod stosowanych w geotechnice, nie tylko w budownictwie liniowym ale także w kubaturowym. Poprzez zastosowanie nowoczesnych materiałów takich jak stal czy beton oraz zaawansowanym technikom wbijania, technologię tę można stosować w różnych warunkach gruntowych [14].

4.2.1. Definicja i klasyfikacja pali

Pał, to długi i smukły element, wbijany pionowo w grunt, aby przenieść obciążenie z powierzchni na głębsze, bardziej stabilne warstwy gruntu lub skały. Pale można klasyfikować na różne sposoby, w zależności od:

- materiału: drewniane, stalowe, betonowe, zbrojone betonowe, kompozytowe itd.,
- metody instalacji: pali wbijane, wiercone, śrubowe,
- funkcji: pale nośne (przenoszące obciążenie), pale kotwiące (zaprojektowane głównie do przeciwdziałania siłom wyciągającym), pale napięciowe,
- kształtu: cylindryczne, kwadratowe, wieloboczne.

4.2.2. Mechanizm działania pali w kontekście wzmocnienia gruntów

Działanie pali opiera się na przenoszeniu obciążeń z powierzchni na głębsze warstwy gruntu. Dwie główne metody przenoszenia obciążenia przez pali to:

- opór czubka: obciążenie jest przenoszone przez czubek pała na grunt lub skałę, na której spoczywa;
- opór boczny: jest to opór, jakim grunt opiera się wzdłuż boków pała.

W kontekście wzmocniania nasypów, pale mogą zapobiegać osiadaniu, przemieszczeniu lub zawaleniu poprzez rozkładanie obciążeń na większą głębokość.

4.2.3. Oczekiwane obciążenia i analiza nośności

Podczas projektowania pali należy brać pod uwagę wiele czynników, takich jak programowe obciążenia z powierzchni, właściwości gruntów i obciążenia boczne z powodu ciśnienia gruntu. Analiza nośności jest podstawą do zapewnienia, że pale będą w stanie bezpiecznie przenosić te obciążenia bez ryzyka osiadania czy zawalenia.

4.2.4. Zastosowanie w nasypach drogowych

- a) Przykłady, w których technologia palowa jest najbardziej odpowiednia:
Technologia palowa do wzmocnienia nasypów drogowych jest najbardziej odpowiednia w następujących sytuacjach:
 - grunty o niskiej nośności: w miejscach, gdzie powierzchniowe warstwy gruntu są miękkie, luźne lub organiczne, pale przenoszą obciążenia z nasypu na głębsze, bardziej stabilne warstwy;
 - niejednorodne podłoże: w miejscach o zróżnicowanej geologii lub tam, gdzie istnieją różnice w głębokości warstw gruntu
 - zmienne warunki wodne: W miejscach o wysokim poziomie wód gruntowych lub w obszarach podatnych na zalania, pale mogą zapewnić stabilność nasypu, chroniąc go przed podmywaniem czy osiadaniem;
 - rozbudowa istniejących dróg: gdy istniejąca droga jest rozbudowywana lub modernizowana, wbijanie pali może być preferowane ze względu na mniejszą niż inne metody wzmocniania ingerencję w obiekt.
- b) Analiza porównawcza z innymi metodami wzmocnienia:
 - Geosyntetyki: materiały takie jak geosiatki czy geotekstyli, są często stosowane do wzmocniania nasypów, tworząc warstwowe struktury wzmocniające. Choć są mniej inwazyjne niż pale, mogą nie być odpowiednie dla bardzo miękkich gruntów;
 - ściany oporowe i gabiony: są stosowane do podtrzymywania nasypów, aczkolwiek nie przenoszą obciążenia tak skutecznie jak pale w głębsze warstwy gruntu;
 - kolumny gruntowo-cementowe: polegają na mieszanii gruntu z cementem, tworząc kolumny o większej nośności; są mniej inwazyjne niż pale, ale mogą nie być tak trwałe.

4.2.5. Wytyczne do projektowania i wskazówki praktyczne

- a) Ocena warunków gruntowych:
Aby odpowiednio rozpoznać warunki geologiczne danego podłoża gruntowego należy wykonać:
 - Badania geotechniczne: Pobieranie wiertnicami próbek gruntu w celu ustalenia jego składu, konsystencji i innych właściwości.

- Testy laboratoryjne: Poddanie próbek analizie laboratoryjnej w celu ustalenia właściwości mechanicznych i fizykochemicznych gruntu
 - Ocena wód gruntowych: Należy zbadać poziom, przepuszczalność oraz potencjalne wpływy hydrodynamiczne.
- b) Dobór odpowiedniego pala:
- Odpowiedni typ pala dobiera się na podstawie oceny warunków gruntowych. Przy wyborze odpowiedniego pala należy wskazać:
- materiał pala: który z materiałów takich jak drewno, stal, czy beton będzie najlepszym rozwiązaniem dla konkretnego zastosowania;
 - metoda instalacji: czy grunt pozwala na wbijanie, wiercenie czy śrubowanie;
 - długość i średnica: ostateczne wymiary pala zależą od obciążeń, oraz warunków gruntowych.
- c) Wytyczne dotyczące wbudowania:
- By osiągnąć odpowiednią efektywność tej technologii należy zwrócić uwagę na kilka aspektów technologicznych wbudowania pala:
- młot do wbijania: musi być dostosowany do rodzaju pala i gruntu;
 - kierowanie i kontrola pionowości: upewnienie się, że pale są wbijane w sposób pionowy (chyba że projekt wymaga inaczej);
 - monitorowanie: podczas wbijania pala obserwacja jego postępu i kontrola ewentualnych odchyłeń.
- d) Kontrola jakości i testy po instalacji:
- Po zakończeniu procesu wbijania, ważne jest aby przeprowadzić odpowiednie testy w celu sprawdzenia, czy pal wypełnia swoją funkcję:
- testy obciążeniowe: mogą być przeprowadzane na wybranych palach, aby ocenić ich zdolność do przenoszenia obciążeń;
 - inspekcje wizualne: sprawdzanie widocznych części pala oraz powierzchni wokół niego w celu wykrycia ewentualnych problemów.

4.2.6. Możliwe wyzwania i ograniczenia technologii palowej

- a) Zmienne warunki gruntowe:
- niejednorodność gruntu: w wielu miejscach grunt nie jest jednorodny na całej głębokości wbijania pala, co może prowadzić do problemów z wbijaniem, a nawet uszkodzenie pala;
 - skaliste podłoże: wbijanie pali w obszarach skalistych będzie niemożliwe i wymagać będzie zmiany metody wbudowania.
- b) Problem z wibracjami:
- uszkodzenie sąsiednich struktur: wibracje powodowane przez wbijanie pali mogą wpływać na sąsiednie budynki, infrastrukturę lub inne struktury, prowadząc do pęknięć lub innych uszkodzeń;
 - zakłócenia dla otoczenia: wibracje mogą być uciążliwe dla ludzi mieszkających czy pracujących w pobliżu miejsca wbijania.
- c) Wpływ na środowisko:
- zmiana przepływu wód gruntowych: wbijanie pali może wpłynąć na naturalny przepływ wód gruntowych, co może prowadzić do problemów z drenażem czy przemieszczaniem się zanieczyszczeń;
 - zakłócenia dla fauny: hałas i wibracje mogą zakłócać życie zwierząt mieszkających w pobliżu.
- d) Koszty i dostępność sprzętu:
- wysokie koszty początkowe: zakup, transport i obsługa odpowiedniego sprzętu może być kosztowna;
 - dostępność sprzętu: w niektórych miejscach może być trudno o dostęp do specjalistycznego sprzętu, co może opóźniać postępy w projekcie.
- e) Ograniczenia projektowe:
- maksymalna głębokość: istnieją ograniczenia w zakresie głębokości, do której można wbijać pale, w zależności od sprzętu i technologii;
 - estetyka: w niektórych projektach widoczne głowy pali mogą nie być estetycznie akceptowalne.

4.3. Wzmocnienia cementacyjne

Wzmocnienia cementacyjne znane były już w starożytnym Rzymie, gdzie do stabilizacji gruntów były używane mieszanki wapienne. Od XIX wieku zaczęto stosować skuteczniejsze metody stabilizacji, rozpoczynając od mieszanek cementowo wodnych a z upływem czasu technologia ta była coraz bardziej rozwijana i udoskonalana poprzez stosowanie nowszych mieszanek cementowych [9,14].

4.3.1. Definicja i znaczenie wzmocnień cementacyjnych:

Wzmocnienia cementacyjne to technika polegająca na ulepszaniu właściwości gruntów poprzez iniekcję mieszanki cementowej; ulepsza wytrzymałość gruntu, redukuje kompresję i poprawia zachowanie się pod obciążeniem.

4.3.2. Składniki mieszanki cementacyjnej

Składniki mieszanki cementacyjnej:

- cement: podstawowy składnik, który stanowi materiał wiążący dla cząsteczek gruntu,
- woda: aktywuje cement i ułatwia jego integrację z gruntem,
- dodatki: składniki modyfikujące, takie jak przyspieszacze, opóźniacze, superplastyfikatory czy włókna wzmacniające, dostosowujące właściwości mieszanki do konkretnych potrzeb.

4.3.3. Technologie i metody wzmocnień cementacyjnych

Technologie i metody wzmocnień cementacyjnych:

- a) iniekcja pod ciśnieniem:
 - iniekcja niskociśnieniowa: dla gruntów luźnych i średnio zwartych,
 - iniekcja wysokociśnieniowa: dla gruntów zwartej struktury.
- b) Grouting:
 - kompozytowe: kombinacje różnych materiałów,
 - chemiczne: stosowanie reaktywnych materiałów do utwardzania;
- c) mieszanie *in-situ*:
 - mieszanie mechaniczne: zaawansowane techniki mieszania gruntu na miejscu;
 - mieszanie hydrauliczne: stosowanie wody pod ciśnieniem.

4.3.4. Kontrola i monitorowanie procesu wzmocnienia

Kontrola i monitorowanie procesu wzmocnienia:

- Zastosowanie geotechniki: wykorzystanie badań geotechnicznych dla precyzyjnej analizy gruntu po wykonaniu wzmocnienia.
- Monitoring ciśnienia iniekcji: kluczowy dla równomiernego wzmocnienia.
- Wykorzystanie nowoczesnych technologii, takich, jak georadary czy skanowanie laserowe.

4.3.5. Zalety i ograniczenia wzmocnień cementacyjnych

Zalety i ograniczenia wzmocnień cementacyjnych:

- a) zalety:
 - długotrwałość rozwiązania.
 - możliwość adaptacji do różnych warunków gruntowych.
 - współpraca z innymi technologiami wzmocnienia.
- b) ograniczenia:
 - wysokie koszty początkowe,
 - wymagana specjalistyczna wiedza i sprzęt.

4.4. Systemy odwodnieniowe i drenaże

Systemy odwodnieniowe jak i drenaże pełnią ważną rolę w utrzymaniu stabilności gruntu, w szczególności biorąc pod uwagę wzmocnienie podłoża gruntowego na terenach osuwiskowych. Nadmiar wody w obszarze osuwiska przyczynia się do zwiększenia ryzyka wystąpienia osuwiska, co kontrolują odpowiednio zastosowane systemy odwodnieniowe które odprowadzają nadmiar wody w gruncie [9-11].

4.4.1. Zasada działania systemów odwodnieniowych

Systemy odwodnieniowe i drenaże działają na zasadzie zbierania i odprowadzania wody z obszaru osuwiska. Główne elementy tych systemów obejmują:

- rynny i kanalizacje: służą do zbierania wody opadowej oraz wód gruntowych, które mogą przyczyniać się do nasycenia gruntu,
- rury drenażowe: odprowadzają zgromadzoną wodę z obszaru osuwiska do punktu odbioru lub zbiorników retencyjnych,
- zbiorniki retencyjne: mogą być stosowane w celu gromadzenia nadmiaru wody, a następnie kontrolowanego jej odprowadzania, co pozwala na równomierne rozprowadzenie wód opadowych.

4.4.2. Rodzaje systemów odwodnieniowych

Systemy odwodnieniowe mogą być dostosowane do różnych warunków terenowych i potrzeb. Istnieje kilka podstawowych rodzajów:

- drenaż powierzchniowy: skupia się na zbieraniu wody opadowej z powierzchni terenu za pomocą rowów, kanałów, oraz rur drenażowych; jest skuteczny w przypadku krótkotrwałych opadów deszczu;
- drenaż podziemny: odprowadza wodę z głębszych warstw gruntu za pomocą systemu rur drenażowych, które są zainstalowane pod powierzchnią ziemi; jest bardziej efektywny w przypadku głębszych wód gruntowych;
- drenaż głęboki: wykorzystuje studnie drenarskie lub studnie filtracyjne, które zbierają wodę z głębszych warstw gruntu; jest skuteczny w obszarach z wysokim poziomem wód gruntowych.

4.4.3. Wpływ systemów odwodnieniowych na stabilność terenu oraz integracja z innymi technologiami wzmocnienia

Poprzez kontrolowanie poziomu wód gruntowych oraz zmniejszeniu nacisku hydrotechnicznego na cząsteczki gruntu drenaże oraz systemy odwodnieniowe przyczyniają się do polepszenia stabilności terenu, zmniejszając ryzyko osunięć powodowanych przez zamiany wilgoci. Systemy odwodnieniowe i drenaże stosuje się we współpracy z innymi technologiami wzmocnienia podłoża gruntowego, takimi jak geosyntezyki, wzmocnienia cementacyjne czy technologie palowe.

4.5. Gwoździowanie gruntu

Gwoździowanie gruntu to technologia wzmocnienia podłoża gruntowego, która jest stosowana na obszarach o niestabilnym podłożu np. na terenach osuwiskowych. W metodzie tej wbudowujemy w grunt specjalne stalowe gwoździe lub pręty w celu zwiększenia jego nośności oraz stabilności [10,11].

4.5.1. Zasada działania

Gwoździowanie gruntu obejmuje wiercenie otworów w gruncie, a następnie umieszczenie w nich metalowych gwoździ lub prętów, które najczęściej wykonane są ze stali o dużej wytrzymałości. Gwoździe te są wbudowywane w określonych odstępach i głębokościach, dostosowanych do warunków projektowych.

4.5.2. Rodzaje gwoździ

Wyróżnia się kilka typów gwoździ:

- gwoździe gwintowane: posiadają gwint ułatwiający penetrację i powodujący lepsze połączenie z gruntem;
- gwoździe rozprężne: wzmacniają podłoże gruntowe poprzez rozprężanie po ich wbudowaniu;

- gwoździe wbijane: wbijane mechanicznie w grunt, stosuje się je w gruntach miękkich,
- gwoździe chemiczne: utwardzają grunt wokół gwoździ poprzez wykorzystanie reakcji chemicznych.

4.5.3. Zalety i wady

Gwoździowanie posiada takie zalety jak:

- skuteczność w wzmocnieniu różnych rodzajów gruntów,
- możliwość stosowania w trudno dostępnych miejscach,
- szybki proces instalacji.

Aczkolwiek posiada również wady jak wysokie koszty oraz możliwe trudności podczas ich wbudowywania.

5. Podsumowanie

W niniejszym artykule dokonano wszechstronnej analizy wpływu osuwisk na infrastrukturę drogową, podkreślając znaczenie prawidłowej klasyfikacji, identyfikacji oraz stabilizacji osuwisk. Omówiono kluczowe aspekty, takie jak przyczyny powstawania osuwisk, ich skutki oraz metody zapobiegania i minimalizowania ich negatywnego oddziaływania na obiekty drogowe.

Osuwiska stanowią poważne zagrożenie dla infrastruktury drogowej, szczególnie w regionach o złożonej budowie geologicznej, takich jak polskie Karpaty. W artykule przedstawiono klasyfikację osuwisk w zależności od rodzaju materiału, prędkości ruchu oraz mechanizmu powstawania. Zrozumienie tych aspektów jest kluczowe dla opracowania skutecznych strategii zarządzania ryzykiem osuwisk.

Analiza przyczyn powstawania osuwisk wykazała, że są one wynikiem zarówno naturalnych procesów geodynamicznych, jak i działalności człowieka. Naturalne przyczyny obejmują warunki wodne, erozję, aktywność sejsmiczną oraz zmiany w obciążeniu gruntu, podczas gdy przyczyny antropogeniczne są związane z ingerencją w teren, niewłaściwym projektowaniem i realizacją robót ziemnych oraz zanieczyszczeniami.

Skutki osuwisk mają charakter bezpośredni i pośredni. Bezpośrednie skutki obejmują zniszczenie infrastruktury, zagrożenie dla życia i zdrowia ludzi oraz straty w zasobach naturalnych. Pośrednie skutki to problemy z dostępem do dotkniętych obszarów, zakłócenia w komunikacji oraz negatywne wpływy ekologiczne.

W artykule zaprezentowano również metody rozpoznania terenów osuwiskowych, takie jak technologie satelitarne (InSAR), georadary, inklinometry, fotogrametria, teledetekcja oraz badania geofizyczne i geotechniczne. Te zaawansowane metody pozwalają na precyzyjną ocenę ryzyka wystąpienia osuwisk i planowanie odpowiednich działań zapobiegawczych.

Przedstawione technologie wzmocnień podłoża obejmują szerokie spektrum metod, takich jak stosowanie geosyntetyków, technologie palowe, wzmocnienia cementacyjne, systemy odwodnieniowe i drenaże oraz gwoździowanie gruntu. Każda z tych technologii ma swoje zalety i ograniczenia, a ich odpowiedni dobór i zastosowanie zależy od specyficznych warunków terenowych oraz charakterystyki osuwiska.

Podsumowując, artykuł podkreśla znaczenie kompleksowego podejścia do problematyki osuwisk i ich wpływu na infrastrukturę drogową. Wiedza na temat klasyfikacji, przyczyn i skutków osuwisk, a także zaawansowane metody ich rozpoznania i stabilizacji, są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa i trwałości obiektów drogowych. Efektywne zarządzanie ryzykiem związanym z osuwiskami wymaga ciągłego monitorowania, wdrażania nowoczesnych technologii oraz ścisłej współpracy między inżynierami, geologami i decydentami. Tylko w ten sposób można skutecznie chronić infrastrukturę drogową przed niszczycielskim działaniem osuwisk

Literatura

- [1] Krygowski J.: *Osuwiska i ich wpływ na środowisko przyrodnicze*. Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza. Poznań, 2005.
- [2] Wiłun Z.: *Zarys geotechniki*.
- [3] Wójcik A., Wojciechowski T.: *Osuwiska jako jeden z ważniejszych elementów zagrożeń geologicznych w Polsce*. Przegląd Geologiczny, vol. 64, nr 9, 2016. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-a824ba95-aeaa-4503-ac0d-4f80e58f39d0>

- [4] Chowaniec J., Wójcik A.: *Osuwiska w województwie małopolskim*. Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Zespół Geologii. Kraków 2012.
- [5] Borowiecki I., Ślusarski M.: *Lotniczy skaning laserowy lidar miasta Krakowa (ocena dokładnościowa)*. Polska Akademia Nauk oddział w Krakowie, nr 3/2010; <http://yadda.icm.edu.pl/agro/element/bwmeta1.element.dl-catalog-cc129e17-2544-423d-91fb-70b15b3b6ef0/c/Borowiecki.pdf>
- [6] Perski Z., Przyłucka M.: *Interferometryczny monitoring terenu Polski etap I*. Państwowy Instytut Geologiczny, Państwowy Instytut Badawczy. Warszawa 2020. https://www.pgi.gov.pl/images/geozagrozenia/interferometria/wy-niki_etap_i/raport_inmotep_nielegalna.pdf
- [7] Perski Z., Wojciechowski T., Wójcik A.: *Techniki naziemne, lotnicze i satelitarne w rozpoznawaniu osuwisk*. XIV Sympozjum Ogólnokrajowe Hydrotechnika, 2012. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-01562993-043e-4333-aabb-17f937e63570>
- [8] *Wytycznych wykonywania badań podłoża gruntowego na potrzeby budownictwa drogowego. Część 1: Wytyczne badań podłoża budowlanego w drogownictwie*. <https://www.pgi.gov.pl/aktualnosc/display/11614-wytyczne.html>
- [9] Szałat A., Gutowski R.: *Nasypty drogowe: projektowanie, budowa, utrzymanie*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2002.
- [10] Opolska D.: *Projektowanie i wzmocnianie nasypów na gruntach słabonośnych*. Kraków. Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, nr 3/2012. https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-e8d0bcb0-4e2c-43fc-81ea-8ab722fa66b9?q=bwmeta1.element.baztech-volume-1734-6681-nowoczesne_budownictwo_inzynieryjne-2012-nr_3;14&qt=CHILDREN-STATELESS
- [11] Bzówka J.: *Wybrane techniki wzmocniania słabego podłoża gruntowego w budownictwie komunikacyjnym*. Inżynieria Morska i Geotechnika, nr 3/2015. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-b4bd7260-0fad-46d3-86d0-f1f2c72d2042>
- [12] Zamiar Z., Surowiecki A.: *Przykłady szybkich technologii odbudowy infrastruktury transportowej w sytuacjach kryzysowych*. Logistyka i transport, 2005. <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BPW6-0018-0011>
- [13] Horodecki G., Duszyńska A.: *Dobór geotekstyliów i wyrobów pokrewnych pełniących funkcję zbrojenia w budownictwie komunikacyjnym – wybrane problemy inżynierskie*. Magazyn Autostrady, 11-12/2017. https://www.researchgate.net/publication/322701148_Dobor_geotekstyliow_i_wyrobow_pokrewnych_pelniacych_funkcje_zbrojenia_w_budownictwie_komunikacyjnym_-_wybrane_problemy_inzynierskie_Selection_of_geotextiles_and_related_products_for_reinforcement_func
- [14] Pułak O., Rybak C., Sarniak W.: *Fundamentowanie. Projektowanie posadowień*. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2001. <https://docer.pl/doc/eex5n5c>

Źródła

- [15] https://www.pgi.gov.pl/images/stories/artykuly/geohaz_karpaty/rozmieszczenie_karpaty.jpg [15.09.2023]
- [16] BS 8006:2010 [15.09.2023]

Problems of impact of landslides on road structures

Abstract

The article analyzes multifaceted issues related to the impact of landslides on road infrastructure. The main topics covered include landslide classification, stabilization methods, examples of landslides in Poland, landslide terrain reconnaissance and ground reinforcement technologies. The section on landslide classification presents different types of landslides depending on the mechanism of their formation, material and speed of movement. It also discusses landslide stabilization methods such as drainage, construction of cementation reinforcement, soil nailing and use of geosynthetics. The article includes examples of significant landslides in Poland that have had a significant impact on road infrastructure. Recognition of landslide terrain is a key element of landslide prevention and risk management. Geological and geophysical techniques for assessing landslide risk are described. In addition, modern technologies for ground reinforcement are discussed, including the use of cement injection, micropiles and technologies to help monitor soil stability. The purpose of the article is to provide knowledge on the impact of landslides on road structures and to present effective methods for their identification and stabilization, which is crucial for the safety and sustainability of road infrastructure.

Keywords: landslides, ground reinforcement, road infrastructure, road embankments